



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 1778056 B

(45) 授权公告日 2010. 12. 08

(21) 申请号 200480010949. 4  
 (22) 申请日 2004. 04. 23  
 (30) 优先权数据  
 FI2003A000117 2003. 04. 24 IT  
 (85) PCT申请进入国家阶段日  
 2005. 10. 24  
 (86) PCT申请的申请数据  
 PCT/EP2004/050595 2004. 04. 23  
 (87) PCT申请的公布数据  
 W02004/095738 EN 2004. 11. 04  
 (73) 专利权人 爱立信股份有限公司  
 地址 瑞典斯德哥尔摩  
 (72) 发明人 S·苏利亚尼 G·萨基  
 F·迪帕斯夸莱  
 (74) 专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司  
 72001  
 代理人 李亚非 王忠忠

(51) Int. Cl.  
 H04B 10/17(2006. 01)  
 H01S 3/30(2006. 01)  
 (56) 对比文件  
 US 6384963 B2, 2002. 05. 07, 全文.  
 US 20020097481 A1, 2002. 07. 25, 全文.  
 US 20030011875 A1, 2003. 01. 16, 全文.  
 M. Eiselt, L. Garrett, R. Tkach. Raman  
 Induced Cross Talk with PRBS Modulation.  
 Optical Fiber Communication Conference  
 (OFC) 1 86. 2003, 1(86), 334-335.

审查员 郑娟娟

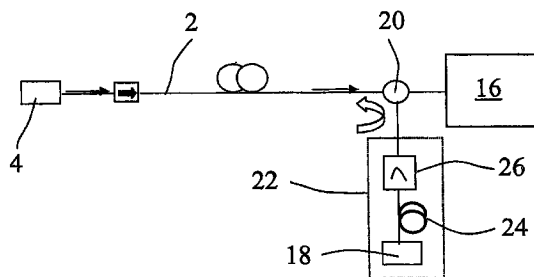
权利要求书 2 页 说明书 9 页 附图 19 页

(54) 发明名称

波分复用光学通信系统中的反泵浦分布式喇曼放大

(57) 摘要

公开了一种喇曼泵浦模块 (22), 用来生成具有一泵浦波长 ( $\lambda_p$ ) 的泵浦辐射, 其用来耦合到光学波分复用 WDM 通信系统的传输光纤 (2) 来提供在其中反传播的 WDM 辐射喇曼放大。该泵浦模块应用在通信系统中, 其中 WDM 辐射具有传输波段 ( $\lambda_s$ ) 并且其中传输光纤 (2) 具有位于传输波段和泵浦波长之间中间位置的零色散波长。该模块 (22) 包括用来生成泵浦辐射的喇曼泵浦激光器 (18), 以及去相关装置 (24), 用来在泵浦辐射耦合到传输光纤之前去相关所述泵浦辐射的纵模。



1. 一种在波分复用 WDM 光学通信系统中提供反泵浦喇曼放大的方法, 该通信系统包括引导具有传输波段的 WDM 辐射的传输光纤, 以及至少一个用来产生具有各自泵浦波长的泵浦辐射的喇曼泵浦激光器, 其中传输光纤具有位于传输波段和泵浦波长之间中间位置的零色散波长, 该方法的特征在于, 在关于 WDM 辐射的反传播方向上将泵浦辐射耦合到传输光纤之前, 去相关泵浦辐射的纵模。

2. 根据权利要求 1 的方法, 其中, 喇曼泵浦激光器是光纤喇曼激光器。

3. 一种光学波分复用 WDM 通信系统, 包括引导具有传输波段的 WDM 辐射的传输光纤; 至少一个用来产生具有各自泵浦波长的泵浦辐射的喇曼泵浦激光器, 以及在关于 WDM 辐射传播方向的反传播方向上将泵浦辐射耦合到传输光纤的耦合装置, 并且其中传输光纤具有位于传输波段和泵浦波长之间中间位置的零色散波长, 该系统的特征在于, 用于在泵浦辐射耦合进入传输光纤之前去相关所述泵浦辐射纵模的去相关装置。

4. 根据权利要求 3 的通信系统, 其中, 喇曼泵浦激光器是光纤喇曼激光器。

5. 根据权利要求 3 或 4 的通信系统, 其中, 去相关装置包括具有色散或非线性特性的一个一定长度的色散补偿或 G. 652 型标准电信光纤, 用于去相关泵浦辐射的纵模; 所述光纤的长度足够在实质上降低在传输光纤 (2) 中传播的过程中接近谐振的反传播的放大自发辐射光子的参数增益。

6. 根据权利要求 5 的通信系统, 还包括在所述长度的光纤和耦合装置之间的滤波器, 用于阻挡在所述长度的光纤中喇曼效应产生的自发辐射。

7. 根据权利要求 3 的通信系统, 其中, 去相关装置包括第一光耦合器, 用来分配泵浦辐射, 使其沿着第一和第二光路传播; 包括在其中一个光路中的延迟元件; 以及第二耦合装置, 用来重新组合来自于第一和第二光路的泵浦辐射。

8. 根据权利要求 3 的通信系统, 其中, 去相关装置包括偏振分配器, 用来分配泵浦辐射, 使其沿着第一和第二光路传播; 包括在其中一个光路中的延迟元件; 以及偏振组合器, 用来重新组合来自于第一和第二光路的泵浦辐射。

9. 根据权利要求 3 的通信系统, 还包括多个喇曼泵浦激光器, 每个喇曼泵浦激光器用来生成具有各自不同泵浦波长的泵浦辐射; 各自的去相关装置, 用来去相关泵浦辐射的纵模; 以及多路复用装置, 用来组合泵浦辐射。

10. 一种喇曼泵浦模块, 用来生成具有一泵浦波长的泵浦辐射, 其用来耦合到光学波分复用 WDM 通信系统的传输光纤中, 以提供通过其中反传播的 WDM 辐射的喇曼放大, 该 WDM 辐射具有一辐射波段, 并且其中传输光纤具有位于传输波段和泵浦波长之间中间位置的零色散波长, 该模块包括用来产生泵浦辐射的喇曼泵浦激光器, 其特征在于, 用来在泵浦辐射耦合到传输光纤之前去相关所述泵浦辐射的纵模的去相关装置。

11. 根据权利要求 10 的喇曼泵浦模块, 其中, 喇曼泵浦激光器是光纤喇曼激光器。

12. 根据权利要求 10 或 11 的喇曼泵浦模块, 其中, 去相关装置包括具有色散或非线性特性的一个一定长度的色散补偿或 G. 652 型标准电信光纤, 用于去相关泵浦辐射的纵模; 所述光纤的长度足够实质上降低在传输光纤 (2) 中传播的过程中接近谐振的反传播的放大自发辐射光子的参数增益。

13. 根据权利要求 10 的喇曼泵浦模块, 其中, 去相关装置包括第一光耦合器, 用来分配泵浦辐射, 使其沿着第一和第二光路传播; 包括在其中一个光路中的延迟元件; 以及第二

耦合装置,用来重新组合来自于第一和第二光路的泵浦辐射。

14. 根据权利要求 10 的喇曼泵浦模块,其中,去相关元件包括偏振分配器,用来分配泵浦辐射,使其沿着第一和第二光路传播;包括在其中一个光路中的延迟元件;以及偏振组合器,用来重新组合来自第一和第二光路的泵浦辐射。

## 波分复用光学通信系统中的反泵浦分布式喇曼放大

[0001] 本发明涉及光学通信系统,特别涉及在波分复用 WDM 光学通信系统中的反泵浦(counter-pumped) 分布式喇曼(Raman) 放大。此外,本发明提供一种用于提供反泵浦喇曼放大的方法,一种包括反泵浦分布式喇曼放大的光学 WDM 通信系统以及一种喇曼泵浦模块。

[0002] 在图 1 中示出了 WDM 光学通信系统的简图,所述 WDM 光学通信系统使得沿着单一光纤(2) 传输 N 个通信信道成为可能。众所周知,每个传送器(4) TX1 到 TXN 将每个通信信道调制到具有各自载波波长  $\lambda_1$  到  $\lambda_N$  的各自光学载波上。光学载波通常称为波长信道。与通信信道(光学信号) 调制的光学载波,起始于传送器(4),通过多路复用器(6) MUX 组合成形成由传输功率放大器(8) 光学放大的 WDM 辐射,并且沿着光纤(2) 传播。在沿着光纤(2) 传输期间,WDM 辐射由串联的光学放大器(10) ILA 光学放大,用来补偿由传输路径中的光纤和任何其他组件引入的损耗(例如,色散补偿器,平衡滤波器等)。在目的节点,WDM 辐射在被多路分解器(14) DEMUX 分离成独立波长信道并指向到相应的接收器(16) RX1 到 RXN 之前,由接收机功率光学放大器(12) RPA 进行光学放大。

[0003] 这种通信系统的开发倾向于连续增加它们的传输能力(即,WDM 波长信道的数量越多,调制频率越高),并且倾向于在没有进行光电转换的情况下覆盖日益增大的距离。喇曼放大,特别是分布式喇曼放大,在 WDM 光学通信系统的开发中起到一份作用。尽管图 1 中示出的光学放大器(8,10,12) 是离散放大器,典型的是掺铒光纤放大器 EDFA,并且其包括放大介质(掺铒光纤),但分布式喇曼放大器利用传输光纤作为放大介质。图 2 中示出了基于 EDFA 和分布式喇曼放大的 WDM 系统框图。喇曼放大可以当 WDM 光信号沿着传输光纤传播时,通过来自喇曼泵浦 RP 激光器(18) 的光学能量到 WDM 光信号的转换获得。喇曼放大通过泵浦沿着 WDM 辐射相同方向传播即协同传播的适当波长的辐射获得,或者利用沿着 WDM 辐射传播方向的相反方向传播即反传播的辐射获得。反传播放大,下文中称为反泵浦,在通过泵浦转移到 WDM 信号中的噪声这方面,与协同传播方案相比较存在较少的问题,并因此更普遍使用在当前商业系统中。泵浦辐射通过光耦合器(20) 耦合到传输光纤(2)。

[0004] 由于在分布式喇曼光学放大器中,来自泵浦的光能到 WDM 辐射的转换出现在传输光纤内部,所以光纤的特性影响放大器特性。现有多种类型的传输光纤:

[0005] G652- 也称为 SFM,具有在大约 1300nm 的零色散和在 1550nm 大约 15ps/km nm 的色散(其中典型的分配 c 波段 WDM 信道,因为二氧化硅光纤的最小衰减发生在 1550nm)。

[0006] G653- 也称为 DSF(色散位移光纤),在 1550nm 具有零色散。这种光纤不太适合在 1550nm(c 波段) 的 WDM 传输,这是因为在 1550nm 的低色散增加了 WDM 信道之间的非线性交互作用。

[0007] G655- 也称为 NZ-DSF(非零色散位移光纤),其既不在 1550nm 也不在 1300nm 波段具有零色散(如 G652 的情形)。根据上面所提到的情况可以列为:

[0008] TW-RS:在 1450nm 具有零色散(OFS)

[0009] TW-CLASSIC:在 1515nm 具有零色散(OFS)

[0010] TW-PLUS:在 1530nm 具有零色散(OFS)

[0011] E-LEAF :在 1500nm 具有零色散 (CORNING)

[0012] FREE-LIGHT :在 1500nm 具有零色散 (PIRELLI)

[0013] 在当前光学通信系统中使用二氧化硅传输光纤的情况下,最大喇曼增益出现在泵浦波长和信号波长 (具有比信号更低波长的泵浦) 之间大约 13THz (100nm) 的频率差上。

[0014] 喇曼放大改善了系统输出的光学信噪比 (OSNR),降低了由于光纤中非线性传播现象造成的损失,并且因此对于增加系统的传输能力和不必采取光到电到光的转换而达到的最大距离是很有用的。

[0015] 尽管比协同传播喇曼放大具有更少的问题,但是在特定条件下并且具有特定传输光纤特性的反泵浦喇曼放大能够引起严重损失,最特别的是当试图增加泵浦激光器的功率来在传输和接收位置之间具有很长连接的通信系统中提供更大光学增益时。通常,在光纤的零色散波长  $\lambda_M$  位于泵浦波长  $\lambda_P$  和信号波长  $\lambda_S$  之间的中间位置时,或者换句话说是在泵浦波长和信号波长的色散与一绝对值相同时,使用反泵浦喇曼放大的光学信噪比退化问题就会出现;在这些条件下,信号下的 ASE (放大自发辐射) 以与泵浦相同的群速传播,并且因此与泵浦进行有效的交互作用。

[0016] 实际上,对于同时利用离散 EDFA 放大器和反泵浦分布式喇曼放大器的通信系统的 WDM 信号来讲能够被配置在传统的 EDFA 波段 (从 1530 到 1560nm) 或者在 EDFA 宽波段 (从 1570 到 1600nm)。

[0017] 假定喇曼泵浦必须配置在波长低于 WDM 信道的大约 100nm,我们的第一近似是,即用于使用传统波段 (1530-1560nm) EDFA 的系统的喇曼泵浦位于 1430-1460nm 范围内,而在具有宽波段 EDFA (1570-1600nm) 系统的情况下,泵浦位于 1470nm 和 1500nm 之间。

[0018] 应该注意的是,尤其在非零色散位移光纤 (NZ-DSF) 情况下,零色散波长可能位于泵浦激光器辐射和传统 WDM 信号之间。

[0019] 在 G655 类型传输光纤中,用于光纤的零色散波长  $\lambda_M$  实际上可以位于泵浦波长  $\lambda_P$  和 WDM 信号波长  $\lambda_S$  之间的中间位置。在这样一种谐振条件下 (也就是,  $[\lambda_S, \lambda_P] / 2 = \lambda_M$ ), 通过将讨论的不同机构,尽管泵浦激光器辐射是反传播,但泵浦仍能够非常有效的将噪声转移到信号。

[0020] 在反传播情况下,将泵浦辐射的噪声转移到信号的物理机制是复杂的。应当想到的是,除了放大信号,喇曼放大还引入了放大自发辐射 (ASE) 噪声,其沿着传输光纤双向传播 (与 WDM 信号的 ASE+ 协同传播以及关于 WDM 信号的 ASE- 反传播)。此外,分布式喇曼放大产生了噪声的另一主要原因,所述噪声与影响信号和 ASE 的瑞利反向散射现象相关。泵浦辐射以及关于泵浦 (ASE-) 协同传播的放大自发辐射之间非线性交互作用的存在以及泵浦的相对强度噪声 (RIN) 到自发辐射的转移进一步使得机制复杂化。

[0021] 总体来说,在谐振条件下削弱分布式喇曼放大器性能的现象与泵浦辐射和在与泵浦 (ASE-) 相同方向上传播的自发辐射之间的有效非线性参数增益交互作用有关,特别归因于谐振条件 (参数增益是非线性谐振四波混频现象)。ASE- 在谐振区被极大的放大,也就是,对于波长来讲其在光纤零色散波长的另一侧关于泵浦对称。非线性参数增益交互作用引起 ASE- 在光谱区 (凸起) 过分地增长,喇曼增益并且因此利用的泵浦较高;ASE- 在泵浦方向的传播被反向散射,并且通过准确的在信号光谱范围引起协同自发 ASE+ 辐射累积的泵浦被再放大,削弱了它们的信噪比。

[0022] 除此以外,在与信号的双瑞利反向散射(DRS)相关的谐振条件下,存在另一种削弱性能的机制,其中单独的反向散射信号在与泵浦相同的方向上传播,并且因此能够经历了喇曼放大之外的参数放大。双反向散射经历经一步的喇曼放大,并且因此引起信号串扰。

[0023] 当采用的泵浦激光具有相对较窄的波段(小于1nm)并且在谐振条件下使用在大功率时,这些现象是特别有限的。而且泵浦激光的相对噪声强度(RIN)特性可能影响这种现象,但是局限于较小的程度。由于它们的高功率以及低成本,采用的典型的光纤喇曼激光器受到所述问题的严重影响。即使其他类型的泵浦光源,例如多路偏振(或者去偏振)并且特征为较低RIN的法布里-珀罗(Fabry-Perot)激光器,引起在谐振条件下较少的损失,但是不能够提供象利用光纤喇曼激光器获得的并且具有长光纤/损耗的WDM系统所需要的高增益。

[0024] 本发明的目的是提供一种反泵浦喇曼放大器以及一种提供反传播喇曼放大的方法,其至少部分克服在谐振条件下由于上述现象引起的缺点和损失。

[0025] 另一个目的是提供一种方法和系统,其能够利用高功率/低成本光纤喇曼激光器获得高的喇曼增益。

[0026] 实质上,本发明包括在将其注入到关于WDM信号反向传播的传输光纤之前故意地去相关泵浦辐射的纵模,以至于引入在激光泵浦辐射纵模之间的相移,其对于消除上述的谐振现象是足够的。

[0027] 引入到泵浦激光器辐射的去相关的幅值必须限制到抵消这样波长的ASE-放大峰值所需的最小值,该波长关于在传输光纤中零色散相反侧的泵浦激光器辐射的波长对称,并且因此关于作为上述机制结果的ASE+自发辐射对称。

[0028] 根据本发明,还提供了一种方法,该方法提供了在波分复用WDM光学通信系统中的反泵浦喇曼放大,该通信系统包括传输光纤,该传输光纤用来引导具有传输波段的WDM辐射,和至少一个喇曼泵浦激光器,用来产生具有各自泵浦波长的泵浦辐射,并且其中传输光纤具有位于传输波段和泵浦波长之间中间位置的零色散,该方法的特征在于在关于WDM辐射的反传播方向上将泵浦辐射耦合到传输光纤中之前,去相关泵浦辐射的纵模。通过充分去相关泵浦辐射纵模,这实质上会减小在传输过程中WDM辐射光学信噪比的退化。

[0029] 有利的是,该方法还包括利用光纤喇曼激光器生成泵浦辐射。这种激光器与其他类型激光器相比较提供了相对低成本的高输出功率的优点。

[0030] 根据本发明的第二方面,还提供了一种光学波分复用WDM通信系统,包括引导具有传输波段的WDM辐射的传输光纤;至少一个用来产生具有各自泵浦波长的泵浦辐射的喇曼泵浦激光器,以及在关于WDM辐射传播方向的反传播方向上将泵浦辐射耦合到传输光纤的耦合装置,并且其中传输光纤具有位于传输波段和泵浦波长之间中间位置的零色散波长,该系统的特征在于,在泵浦辐射耦合进入传输光纤之前去相关所述泵浦辐射纵模的去相关装置。

[0031] 优选地,泵浦激光器包括光纤喇曼激光器。可替换地它可以包括法布里-珀罗激光二极管或者其他适当的激光源。

[0032] 有利的是,去相关装置包括为了去相关泵浦辐射纵模而具有色散或非线性特性的一个长度的光纤。在一优选的配置中,它包括一个长度的色散补偿光纤(DCF)。在一工作

在 1550nm 的 WDM 系统中, DCF 具有一产生例如绝对值位于 20ps/nm 和 250ps/nm 之间总色散的长度。例如,它能够包括一 100km 长度的 TW-RS 光纤。色散或非线性特性具有一有效面积  $A_{\text{eff}}$  和非线性系数  $\gamma$ , 来产生充分的泵浦辐射模的去相关,从而减少或抑制 WDM 辐射的退化。

[0033] 有利的是,当去相关元件包括用于去相关模式的一个长度的光纤时,有利的是通信系统还包括在该长度光纤和耦合装置之间的滤波器,用来阻挡该长度光纤中喇曼效应产生的自发辐射。

[0034] 可替换地,去相关装置能够包括第一光学耦合器,用来分配泵浦辐射,使其沿着第一和第二光路传播;包括在其中一个光路中的延迟元件;以及从第一和第二光路重新组合泵浦辐射的第二耦合装置。

[0035] 优选的,在这样一种配置中,延迟元件包括一个长度的光纤,其长度足够去相关泵浦辐射的纵模。

[0036] 在另一个可替换配置中,去相关元件包括偏振分配器,其分配泵浦辐射,使其沿着第一和第二光路传播;包括在其中一个光路中的延迟元件;以及偏振组合器,用来重新组合来自于第一和第二光路的泵浦辐射。

[0037] 有利的是,延迟元件包括一个长度的光纤,其长度足够去相关泵浦辐射的纵模。

[0038] 在一优选的配置中,通信系统还包括多个喇曼泵浦激光器,其每一个激光器产生具有各自不同泵浦波长的泵浦辐射;用于去相关泵浦辐射纵模的各自去相关装置;以及用于组合泵浦辐射的多路复用装置。

[0039] 根据本发明的另一个方面,提供了一种喇曼泵浦模块,用来生成具有一泵浦波长的泵浦辐射,其用来耦合到光学波分复用 WDM 通信系统的传输光纤中来提供其中反传播 WDM 辐射的喇曼放大,该 WDM 辐射具有一传输波段,并且其中传输光纤具有位于传输波段和泵浦波长之间中间位置的零色散波长,该模块包括用来产生泵浦辐射的喇曼泵浦激光器,其特征在于,用来在泵浦辐射耦合到传输光纤之前去相关所述泵浦辐射纵模的去相关装置。

[0040] 有利的是,喇曼模块特征还在于泵浦激光器是光纤喇曼激光器。

[0041] 在一种配置中,去相关装置包括一个长度的光纤,其具有去相关泵浦辐射纵模的色散或非线性特性。有利的是,为了阻挡由该长度光纤中喇曼效应产生的自发辐射,喇曼模块还包括位于之间的滤波器。

[0042] 可替换地,去相关装置能够包括第一光学耦合器,用来分配泵浦辐射,使其沿着第一和第二光路传播;包括在其中一个光路中的延迟元件;以及第二耦合装置,用来重新组合来自于第一和第二光路中的泵浦辐射。优选的,延迟元件包括一个长度的光纤,其长度足够去相关泵浦辐射的纵模。

[0043] 在另一个可替换实施例中,去相关元件包括偏振分配器,其分配泵浦辐射,使其沿着第一和第二光路传播;包括在其中一个光路中的延迟元件;以及偏振组合器,用来重新组合来自于第一和第二光路中的泵浦辐射。

[0044] 延迟元件方便的包括一个长度的光纤,其长度足够去相关泵浦辐射的纵模。

[0045] 通过参考附图对一些非限制性实施例的描述,在下面描述本发明的各个方面和优点。

- [0046] 图 1 是根据前面讨论过的现有技术的 WDM 光学通信系统的图示；
- [0047] 图 2 示出了根据前面讨论过的现有技术的包括反泵浦分布式喇曼放大器的 WDM 光学通信系统；
- [0048] 图 3 示出了对于利用光纤喇曼激光器的反泵浦喇曼放大的已知配置；
- [0049] 图 4 示出了在反泵浦喇曼放大器中信号辐射，泵浦辐射，ASE<sup>+</sup>，ASE<sup>-</sup>，单瑞利反向散射以及双瑞利反向散射信号辐射的传播方向；
- [0050] 图 5 是对于采用“Keopsys”激光器的 500mW 泵浦功率的 ASE<sup>-</sup> 和 ASE<sup>+</sup> 频谱；
- [0051] 图 6 是对于采用“Keopsys”激光器的不同泵浦功率在传输光纤输出端的 ASE<sup>+</sup> 频谱；
- [0052] 图 7 是对于采用 IPG “Fibretech”激光器的不同泵浦功率在传输光纤输出端的 ASE<sup>+</sup> 频谱；
- [0053] 图 8 是等效噪声数 (NF) 对泵浦功率的曲线；
- [0054] 图 9 显示了关于接近谐振条件的开关增益 ( $G_{\text{on-off}}$ ) 的等效噪声数；
- [0055] 图 10 显示了根据本发明第一实施例的反泵浦喇曼放大系统；
- [0056] 图 11 显示了根据本发明第二实施例的反泵浦喇曼放大系统；
- [0057] 图 12 显示了根据本发明第三实施例的反泵浦喇曼放大系统；
- [0058] 图 13 是对于图 3 (现有技术)、图 10 和 11 中所示系统的噪声数 (NF) 对波长的曲线；
- [0059] 图 14 是对于图 3 (现有技术)、图 10 和 11 中所示系统的光学信噪比 (OSNR) 对波长的曲线；
- [0060] 图 15 是对于图 3 (现有技术) 中所示系统以及根据显示在图 10 中具有 8 个输入 WDM 波长信道的本发明的输出频谱；
- [0061] 图 16 对于根据图 3 (现有技术) 中的系统以及根据显示在图 10 中的本发明，信噪比 (S/N) 对开关增益 ( $G_{\text{on-off}}$ ) 的曲线；
- [0062] 图 17 示出了对于根据图 3 (现有技术) 中的系统以及根据显示在图 10 中的本发明，ASE<sup>+</sup> 和 DRS 频谱之间的比较；
- [0063] 图 18 示出了具有两个泵浦激光器的已知反泵浦喇曼放大；
- [0064] 图 19 显示了根据本发明具有两个泵浦激光器的反泵浦喇曼放大。
- [0065] 为了更好的理解本发明，首先更详细的分析光学通信系统并且识别出它的特殊特征和问题是有用的。参考图 3，其中示出了现有反泵浦喇曼放大器配置的总图。如已知的，在反泵浦喇曼放大器中，WDM 辐射和泵浦辐射沿着传输光纤在相反（反传播）方向传播。泵浦辐射能够包括单一波长或者由各个激光器（多路复用在一起）产生的几个波长，所述泵浦辐射具有相比较其所要放大的 WDM 辐射低（典型的低 100nm 量级）的波长。后者提供更宽的增益带宽。
- [0066] 通过例子，下面我们考虑采用单一波长泵浦（利用光纤喇曼激光器 (18) 产生）的喇曼泵浦的最临界例子。如已经提到的，这种泵浦源提供了一高输出功率（但是在不同 W），其特征在于少于 1nm 的线宽以及典型的 -110dB/Hz 级的相对强度噪声 (RIN)。这种源的频谱包括非常多的纵模，具有非常窄的波段（典型的数百 KHz）以及典型的 MHz 级的间隔。泵浦辐射具有低水平的偏振（少于 10%）并且通过光环形器或者通过光耦合器 (20) 耦合到



传输光纤 (2)。

[0067] 图 4 显示了泵浦辐射、WDM 信号、ASE+ (与 WDM 信号协同传播的放大自发辐射)、ASE- (关于 WDM 信号反传播的放大自发辐射) 以及由于 ASE- 的单一瑞利反向散射和 WDM 信号的双瑞利反向散射 (DRS) 的辐射的传播方向。我们来分析在采用图 3 中示出的分布式喇曼放大器配置的传统 EDFA 波段中, 具有用于反泵浦 WDM 信号的单一波长 (1443nm) 的光纤喇曼激光器 (Keopsys)。传输光纤 (2) 是 G. 655 (Pirelli Free-Light) 类型, 在大约 1500nm 具有零色散。因此谐振条件预期在中心位于 1558nm 周围的波长。

[0068] 利用光谱分析仪研究在这样一种系统的传输光纤中产生的 ASE- 和 ASE+ 的频谱特性。图 5 在一特定泵浦功率 (500mW) 比较了 ASE- 和 ASE+ 频谱。注意, 在传输光纤的输出端测量 ASE+, 在传输光纤的输入端测量 ASE-。参考图 5, 很清楚的是存在对应于谐振的一自发 ASE- 累积。比较不明显的, 但是仍然存在的是, 在 ASE+ 中这种过度自发累积的效果。这归因于这样的事实: 由泵浦辐射和自发辐射的直接交互作用产生的谐振区中的 ASE- 过度累积; 在谐振附近的 ASE+ 的增加相反由于反向散射以及 ASE- 的进一步放大, 随着喇曼增益增加, 现象逐渐明显。

[0069] 图 6 示出了当光纤中耦合泵浦的功率增加时 ASE+ 的频谱。从这个图中, 很明显的是对应于谐振的 ASE+ 的累积, 随着泵浦功率并且因此随着喇曼增益而相当大的增加。

[0070] 用来自另一个供应方的 (IPG Fibertech) 具有 1450nm 辐射波长的光纤喇曼激光器重复实验。在这种情况下, 如图 7 所示, ASE+ 频谱显示出在 1550nm 附近随着泵浦功率增加而增加的累积 (凸起)。

[0071] 通过对于分布式喇曼放大器的等效噪声数 (NF) 的分析, 清楚显示出由这种类型现象在光学通信系统中引入的退化, 定义如下:

$$[0072] \quad NF = 10 \log \left( \frac{SNR_{in}}{SNR_{out}} \right) = 10 \log \left( \frac{P_{ASE+}}{h\nu\Delta\nu G_{on-off}} \right)$$

[0073] 其中  $SNR_{in}$  和  $SNR_{out}$  是在放大器输入端和输出端的光学信噪比,  $P_{ASE+}$  是在频带  $\Delta\nu$  中位于输出端的 ASE+ 功率,  $h$  是普朗克 (Planck) 常数,  $\nu$  是信号频率,  $G_{on-off}$  是喇曼放大器的开关增益, 其定义为当泵浦开时输出信号的功率与当泵浦关时输出信号的功率之间的比 (注意集中放大器 (concentrated amplifier) 中物理上用到的净增益定义为信号的输出功率和输入功率之间的比)。分布式喇曼放大器的 NF 可以是负值, 并且根据噪声特性, NF 越低放大器越好。

[0074] 分析关于注入到光纤的泵浦功率的反泵浦分布式喇曼放大器的 NF (或者喇曼增益), 可以获得图 8 中示出的典型曲线。图 8 显示出了对于 100km 的 TW-RS 光纤的结果。NF 随着泵浦功率增加到最佳值而减少, 超过该最佳值时由于 ASE- 反向散射现象它又开始增加, 当放大增益一起累加到 ASE+ 时, 增加它, 并且因此降低放大器的 NF。这种效果不论谐振条件的存在与否都会出现, 并且其对反泵浦分布式喇曼放大是固有的。明显的, 在 NF 增加开始被注意到的功率值随着光纤的变化而变化, 并且特别取决于瑞利反向散射系数以及光纤的有效面积。

[0075] 当谐振存在时, 在图 8 中描述的效果更大, 并且信号一开始接近最大谐振波长, NF 就开始关于泵浦功率 (或者开关增益) 增长。这显示在图 9 中, 分别显示了对于 1542, 1548,

1549.5 和 1551.2nm 信号波长的 NF 作为开关增益 ( $G_{\text{on-off}}$ ) 的函数。当信号波长朝着 1550nm 的谐振增加时,可以明显看出 NF 的增加。

[0076] 在谐振存在时,信号的双瑞利反向散射 (DRS) 通过参数增益,将噪声从泵浦转移到信号的信号反向散射而增强。然而,实验很难测量谐振信号的 DRS 功率,这是因为该功率与 ASE+ 的过度增加融合。

[0077] 下面可以看出来,在谐振条件下本发明怎样避免 ASE+ 的累积,并因此避免 NF 的退化,并且本发明在降低由于信号 DRS 的潜在损失上也是有效的。应该注意的是,信号 DRS 的增加不可避免导致性能的退化,因为这种 DRS 必然认为是对于信号的串扰。

[0078] 从典型的光纤喇曼激光器的频谱辐射特性分析,可以推断出用作泵浦的辐射频谱包括非常多的纵模,其具有非常窄的线宽(几百 kHz)以及 MHz 级的间隔。这些纵模的特征在于很强的相干性,或者换句话说,就是定义明确的相位关系,这是由于它们从相同的激光腔中产生的事实。这个特性具有这样的结果,提供对于在谐振条件(也就是相对于零色散和泵浦波长来讲处于对称波长)下的 ASE- 光子参数增益的非线性交互作用是特别有效的。本发明人理解到,通过遵照由光纤喇曼激光器辐射的泵浦辐射进行适当工作,可能适当去相关构成泵浦辐射的纵模,并且,因此极大降低由谐振 ASE- 光子经历的参数增益的有效性。这直接反映在由于谐振频谱区(可能配置 WDM 信道)中 ASE- 的反向散射的 ASE+ 累积上的急剧减少。因此接着,放大器 NF 以频谱一致方式在高泵浦功率降低,仅因为由喇曼放大产生的 ASE- 的反向散射(见图 8),并且在谐振条件下不会通过参数增益来增加。

[0079] 本发明的三个可能实施例通过例子在下文描述。参考图 10,其中显示了根据本发明第一实施例的反泵浦分布式喇曼放大器的配置。这种配置不同于参考图 3 在前面描述的现有配置的地方在于,喇曼泵浦模块(22)包括与光纤喇曼激光器(18)连接的去相关(色散)元件(24)。典型的,去相关元件能够包括引入了泵浦辐射纵模的适当去相关的短长度光纤(或者其它组件)。例如这种光纤能够包括用来补偿色散的色散补偿光纤(DCF),或者 G.652 型的标准电信光纤(SMF)。实验配置中,在下面讨论的性能结果中,去相关元件包括 2km 长度的色散补偿光纤(DCF)。

[0080] 在该实施例中,有利的是还包括级联滤波器(26),用来阻挡去相关元件(24)中喇曼效应产生的放大自发辐射,该元件包括能够阻挡色散元件中喇曼效应产生的自发辐射功率的一个相当长长度的标准或色散补偿光纤。

[0081] 利用 DCF/SMF 光纤(或者其它类型光纤),去相关泵浦激光器的纵模充分降低了在传输光纤(2)中传播的过程中由靠近谐振的 ASE- 光子经历的参数增益效率。

[0082] 在泵浦辐射耦合到传输光纤之前,适当去相关元件的存在具有这样的结果,由不同对的激光纵模(参数放大仅仅是谐振 FWM 交互作用)在给定频率的谐振区中生成的四波混频(FWM)乘积在相位上而不是功率上累加。将本发明的配置性能以及图 3 配置的性能比较能够看出,获得的效果是,在甚至具有非常高的开关喇曼增益的谐振条件下实质上抑制了自发 ASE+ 凸起,并且随之实质上消除了 NF 损失(或者离开放大器的 SNR 损耗)。降低由于 DRS 引起的串扰的效果是很好的。

[0083] 参考图 11,其中示出了根据本发明另一个反泵浦分布式喇曼放大器的配置。在这个例子中,去相关元件包括两个光耦合器(28,30)以及延迟线(32)。光耦合器(28,30)(能够包括具有 50 : 50 分束比的 3dB 光耦合器,)首先分离泵浦辐射,然后重组泵浦辐射。延

迟线提供在耦合器之间的两个光路中的其中之一上。延迟线 (32) 的长度选成足够去相关泵浦辐射的纵模 (试验结果是利用 250 米的 G. 653, DSF 光纤获得)。

[0084] 泵浦辐射上的效果可以与第一实施例 (图 10) 的效果进行比较, 单一的差别是模之间的相位差现在通过泵浦功率的更大损耗获得 (典型的, 在 3 和 4dB 之间, 而在第一实施例中它少于 1.5dB)。

[0085] 参考图 12, 示出了根据本发明另一个反泵浦分布式喇曼放大器的配置。在这个实施例中, 泵浦辐射被偏振分配器 (34) 分配成正交的偏振分量, 这两个分量中的一个分量由延迟元件 (36) 延迟 (典型的是一适当长度的光纤, 例如 250 米 DS 延迟光纤), 然后在关于 WDM 信号反传播方向上耦合到传输光纤之前, 由偏振组合器 (38) 重新组合两个偏振分量。在该实施例中, 引入到泵浦中的损耗是如在第一实施例中的 1dB 量级。

[0086] 现在介绍一下对于上述三个实施例性能的分析 and 比较。图 13 对于现有喇曼放大器配置 (图 3) 和图 10 和 11 中示出的两个实施例, 提供了对于同等喇曼增益, 靠近谐振条件的 NF 频谱性能之间的比较。从图 13 明显看出相关元件几乎完全消除了 NF 的增加。

[0087] 这种类型的比较也是依据信噪比做出的, 如图 14 所示。从图 14 可以观察到, 所提出的实施例改善了该比率大约 7dB, 实质上消除了当采用单一光纤喇曼激光器 (也就是, 采用光纤喇曼激光器产生的单一泵浦波长) 的谐振时在性能上存在的所有退化。

[0088] 利用与单一波长输入信号相对的 8 波长多路复用信号比较图 3 和图 10 中的配置性能。图 15 清楚显示了对于相等的输出信号功率, 以及因此对于喇曼增益, 所包含的去相关元件怎样有效改善靠近谐振的所有信道的信噪比。去相关元件的存在降低了自发 ASE+ 辐射。

[0089] 对于图 3 和 10 的配置, 在全谐振下的 S/N 性能关于开关增益作比较 (图 16)。去相关元件的存在导致在最大喇曼增益的情况下 S/N 中 10dB 的改善。应该注意的是, 在现有的图 3 配置的情况下, 由于无论谐振存在与否的 ASE- 反向散射 (就 NF 中的退化而言图 8 中描述了相同的现象), 在图 16 中观察到的 S/N 退化在于典型的分布式喇曼放大器, 所述分布式喇曼放大器在反传播方向上泵浦。

[0090] 图 17 显示了对于相同的喇曼增益来讲, 测量图 3 和 10 配置中的 DRS (双瑞利散射) 特性之间的比较。在图中的频谱通过时域消光 (extinction) 技术获得, 其使得能够利用光谱分析仪测量对于 ASE+ 和信号的频谱以及对于 ASE+ 和信号双反向散射的频谱。图 17 中显示了对于图 3 和 10 中两个放大器配置的 ASE+ 和 DRS 频谱。很明显的是, 包含去相关元件 (图 10) 不仅明显降低了存在谐振时 ASE+ 的累积, 而且降低了信号 DRS。应该注意的是, 不能够在对应于谐振的波长处使用信号准确测量 DRS, 因为在这些条件下, DRS 频谱被增宽以至于不可能将其从 ASE+ 中区分。然而, 就 DRS 而言的明显改善还是能够在与图 17 的比较中注意到。

[0091] 应该认识到的是, 本发明还能够有用地应用于利用具有不同泵浦波长的几个泵浦辐射源的系统中, 用来扩展由分布式喇曼放大器提供的增益波段。图 18 中示出了一种这种配置, 其中显示采用了两个泵浦激光器源 (18a, 18b), 一个位于泵浦波长  $\lambda_{p1}$ ; 另一个位于泵浦波长  $\lambda_{p2}$ 。在该例子中, 两个泵浦激光器辐射源 (18a, 18b) 都是光纤喇曼激光器。在波长  $\lambda_{p1}$  和  $\lambda_{p2}$  的两个泵浦辐射通过多路复用器 (40) 组合, 并且通过环形器 (或者耦合器) (20) 以反传播方向馈送到传输光纤 (2)。

[0092] 图 19 显示出根据本发明,通过在泵浦激光器辐射的每个源 (18a, 18b) 和多路复用器 (40) 之间引入去相关元件 (42a, 42b) 来改进图 18 中光学通信系统的视图。第一去相关元件 (42a) 在波长  $\lambda_{p1}$  适当去相关泵浦辐射的纵模,第二元件 (42b) 在波长  $\lambda_{p2}$  提供适当去相关。当然,去相关元件能够根据已经描述的任何一個实施例而构造。

[0093] 尽管在描述的实施例中,泵浦源是光纤喇曼激光器(可以回忆以下是在最临界情况),但本发明可用于在泵浦辐射源是任何其他类型例如偏振或者去偏振多路复用法布里-珀罗激光二极管的情况下,抑制由于谐振现象产生的信噪比退化。此外在描述的实施例中,可能包括一装置,用来在有必要在某部分末端提取残留泵浦辐射的情况下,根据构造光学通信系统的普通技术从传输光纤提取反传播泵浦激光器辐射,例如利用光耦合器或者环形器。

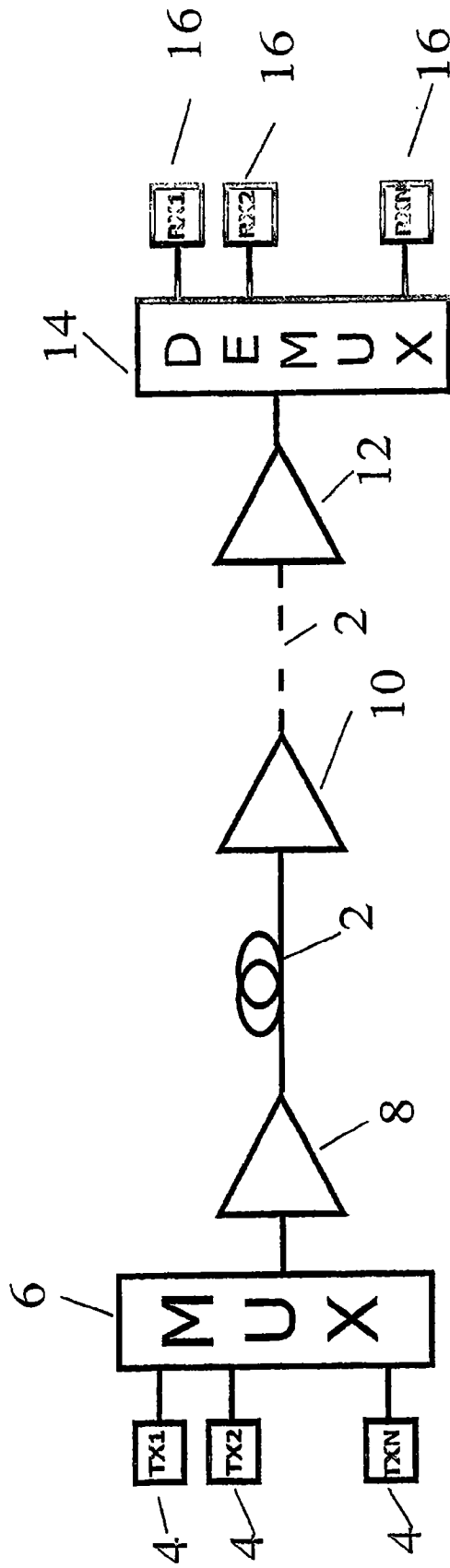


图 1

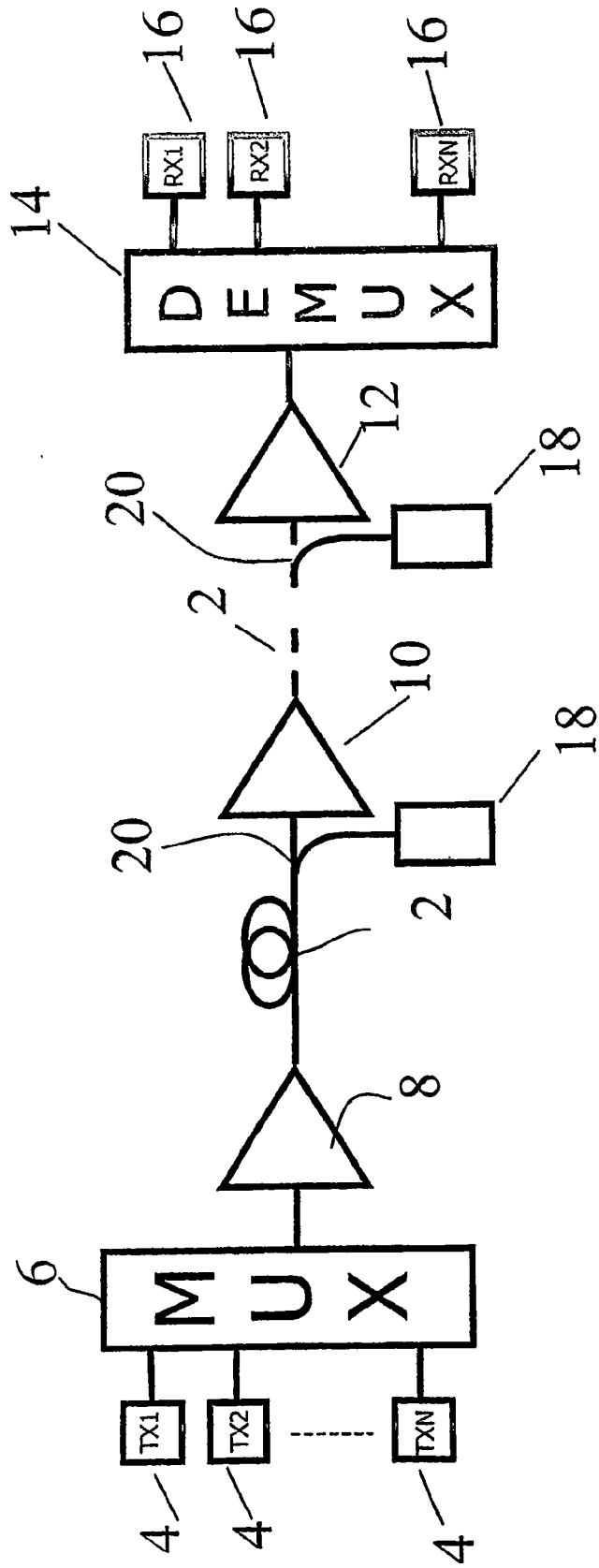


图 2

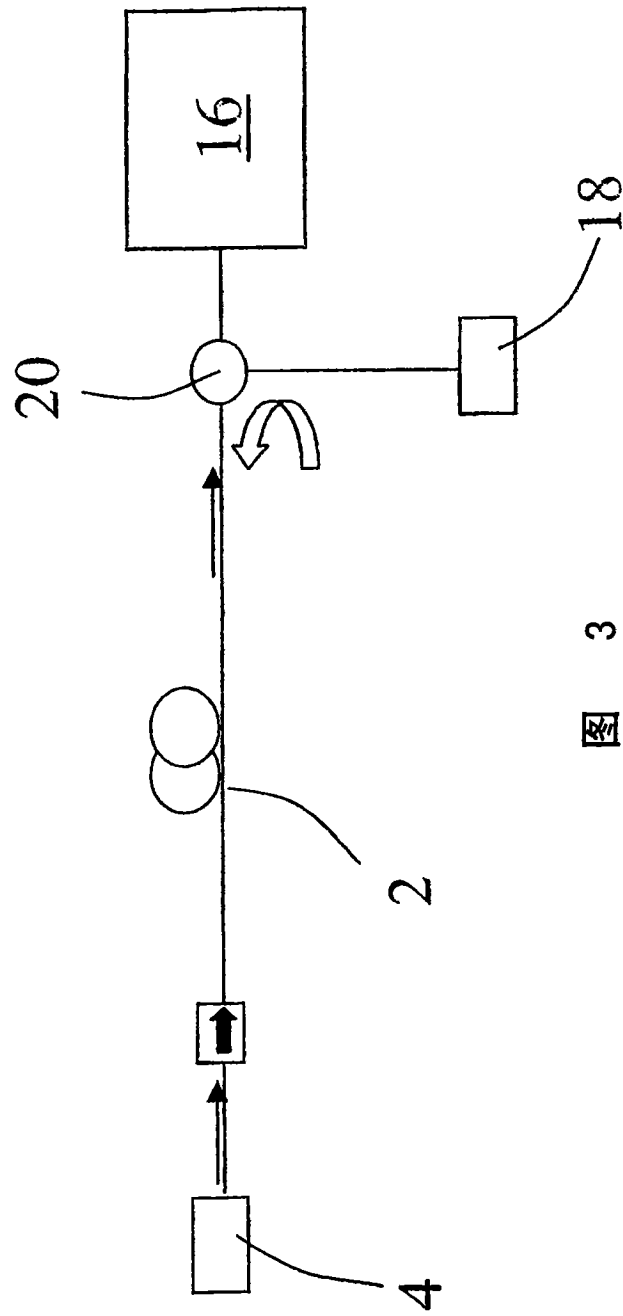


图 3

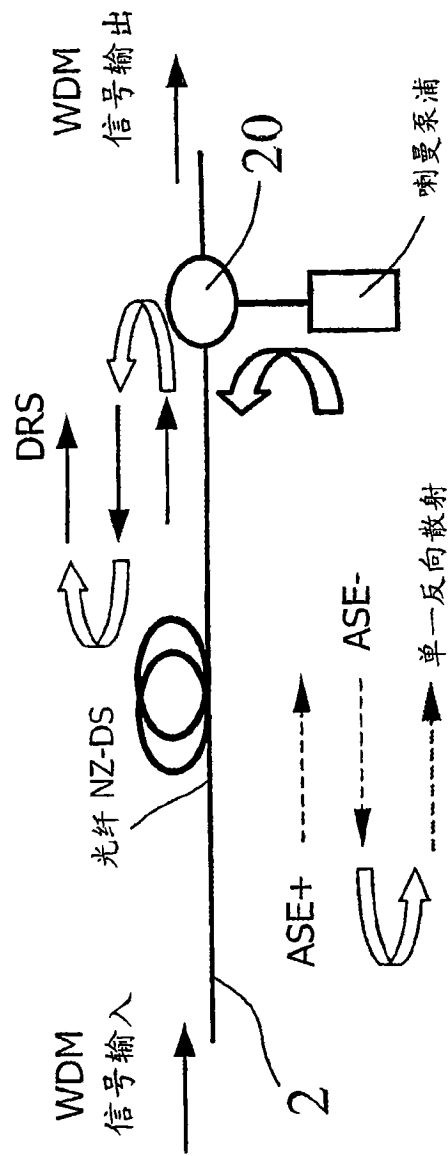


图 4



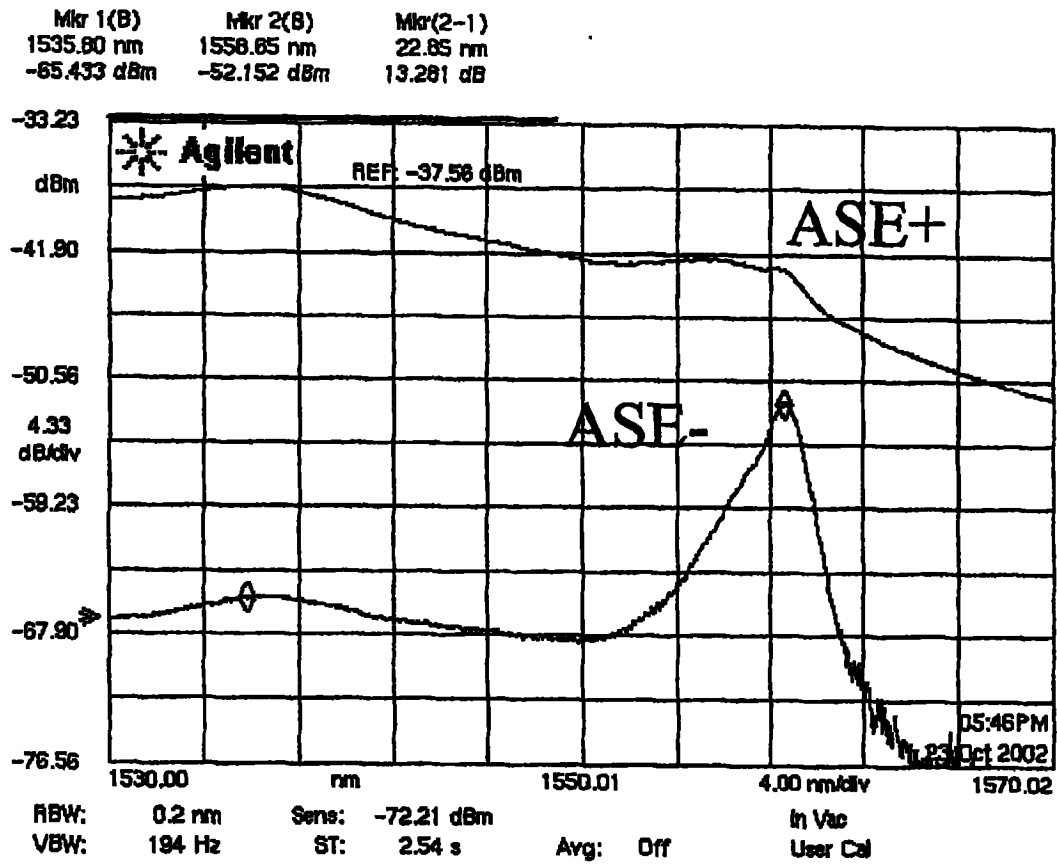


图 5

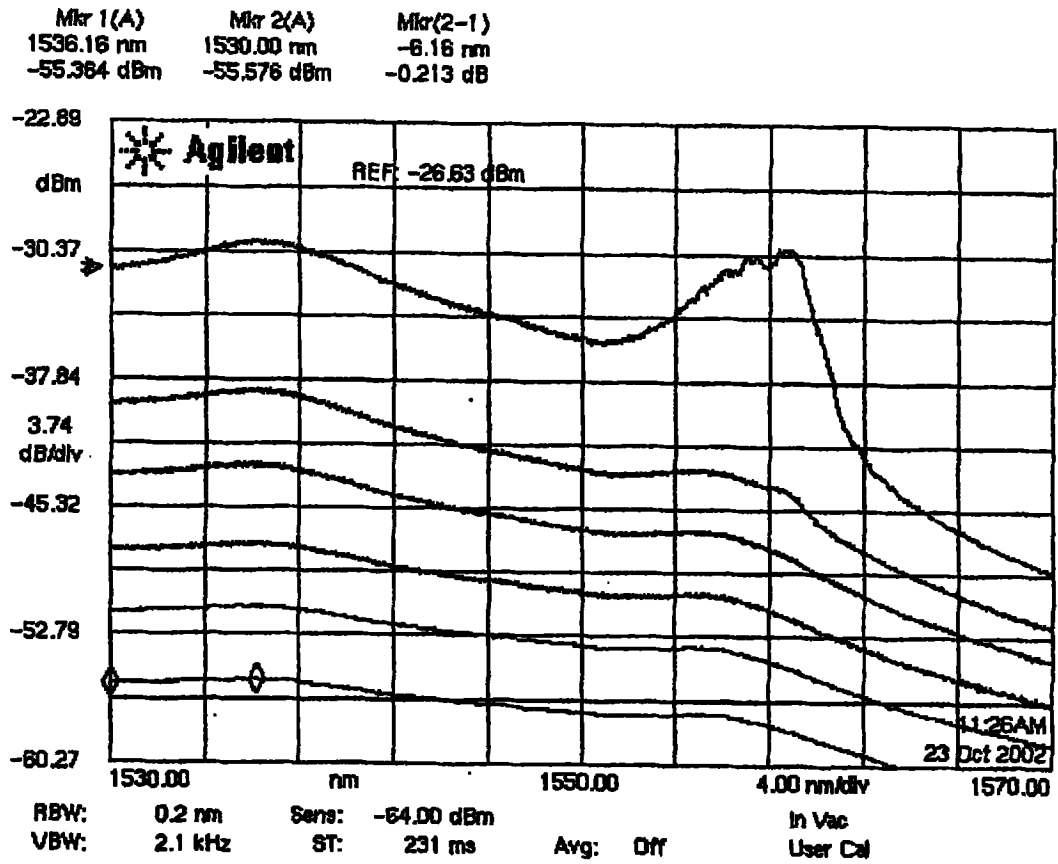


图 6

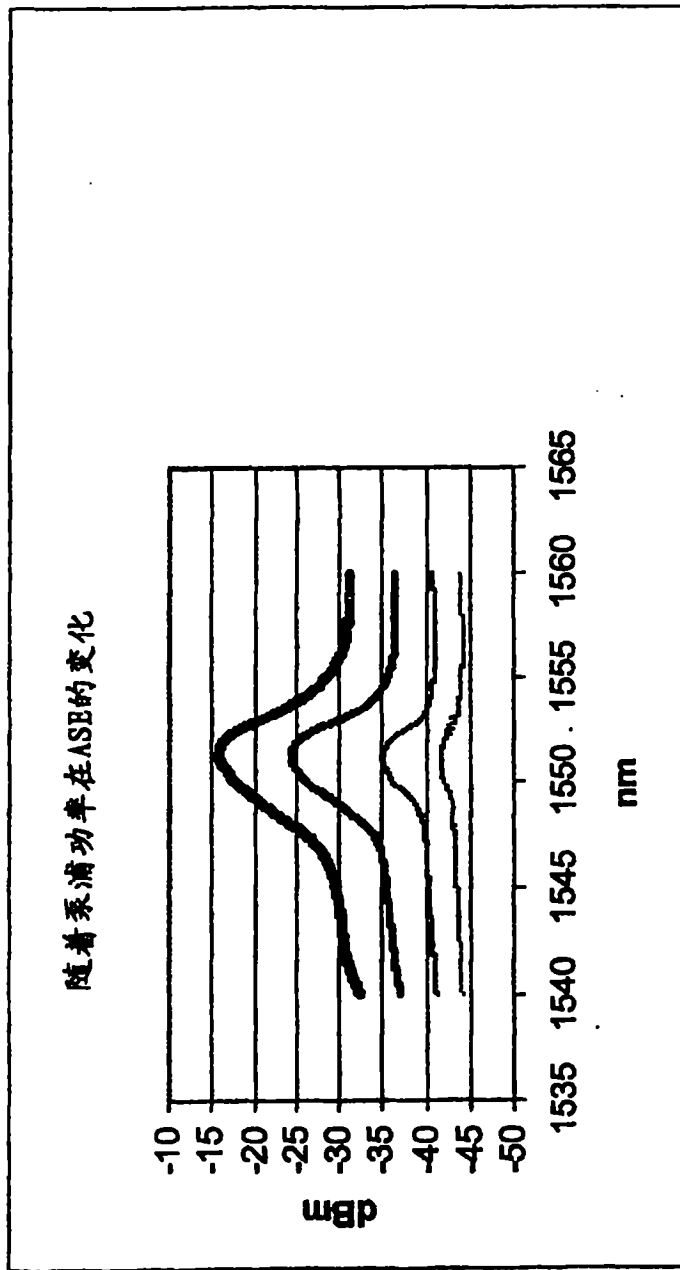


图 7

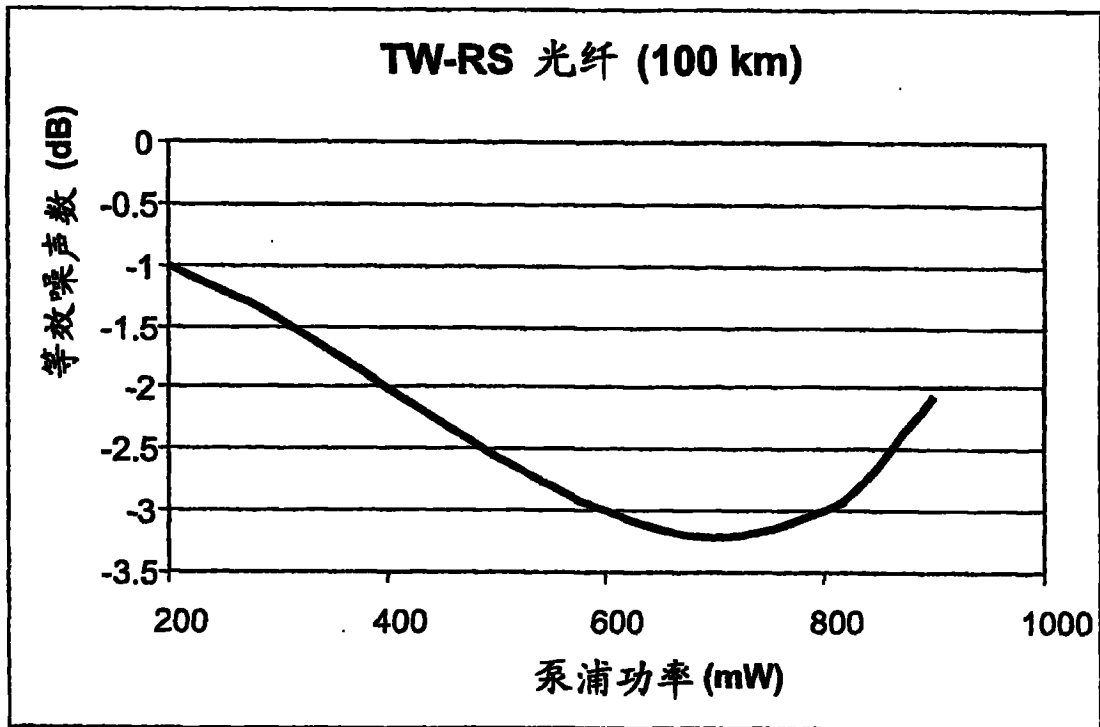


图 8

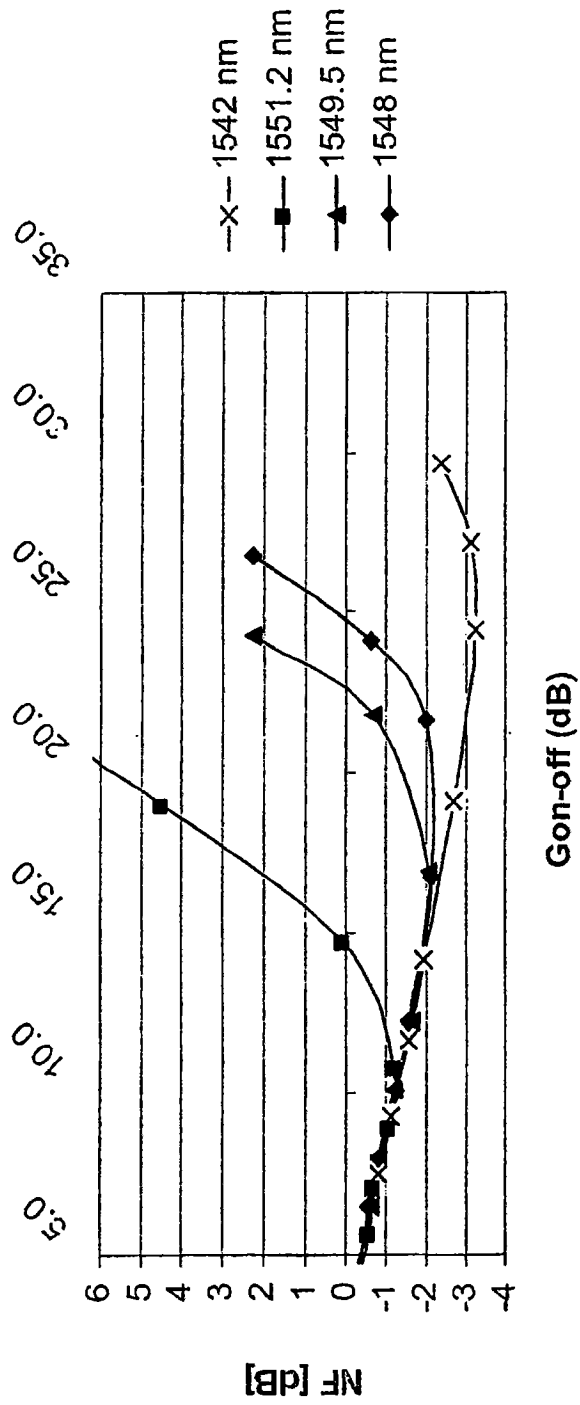


图 9

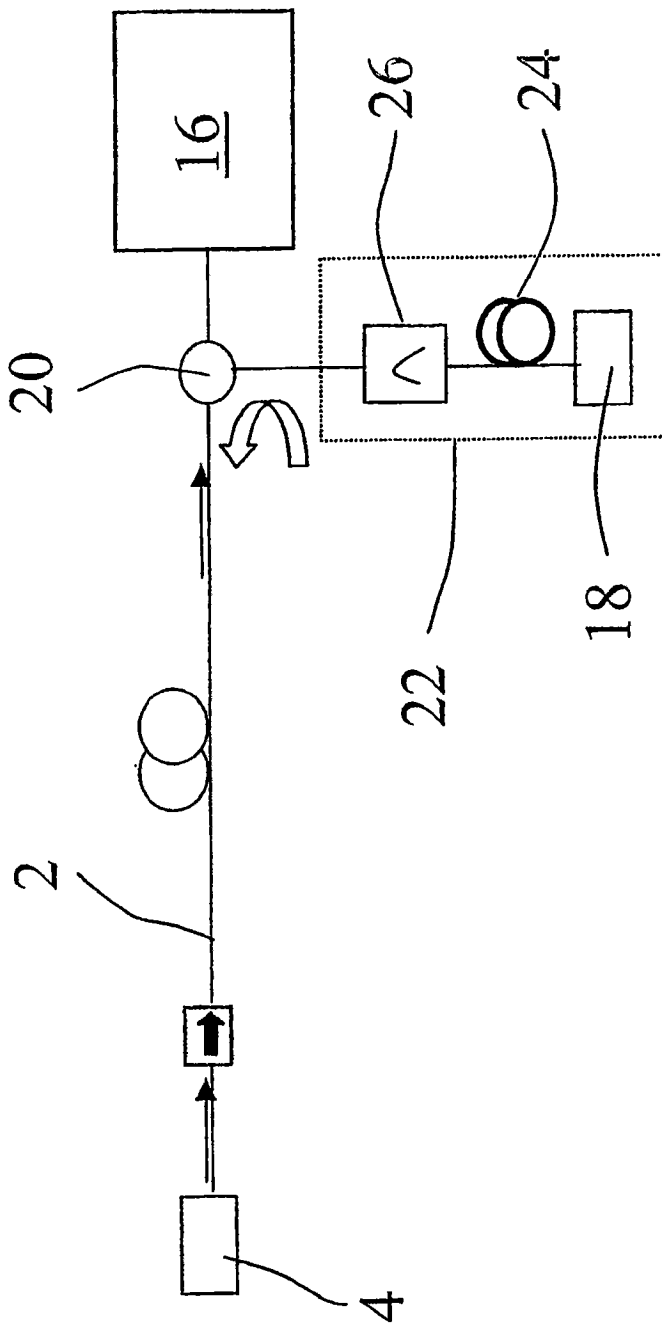


图 10

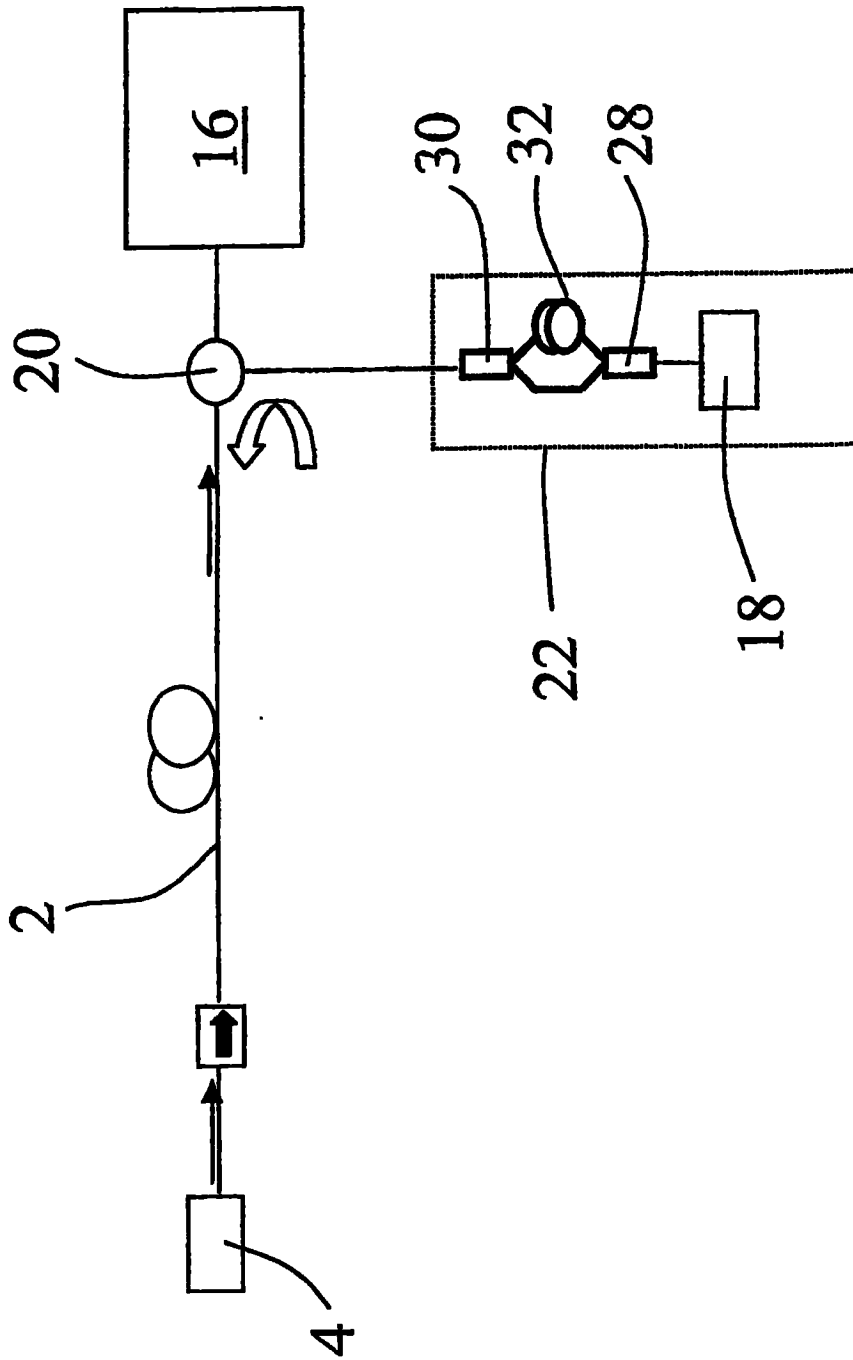


图 11

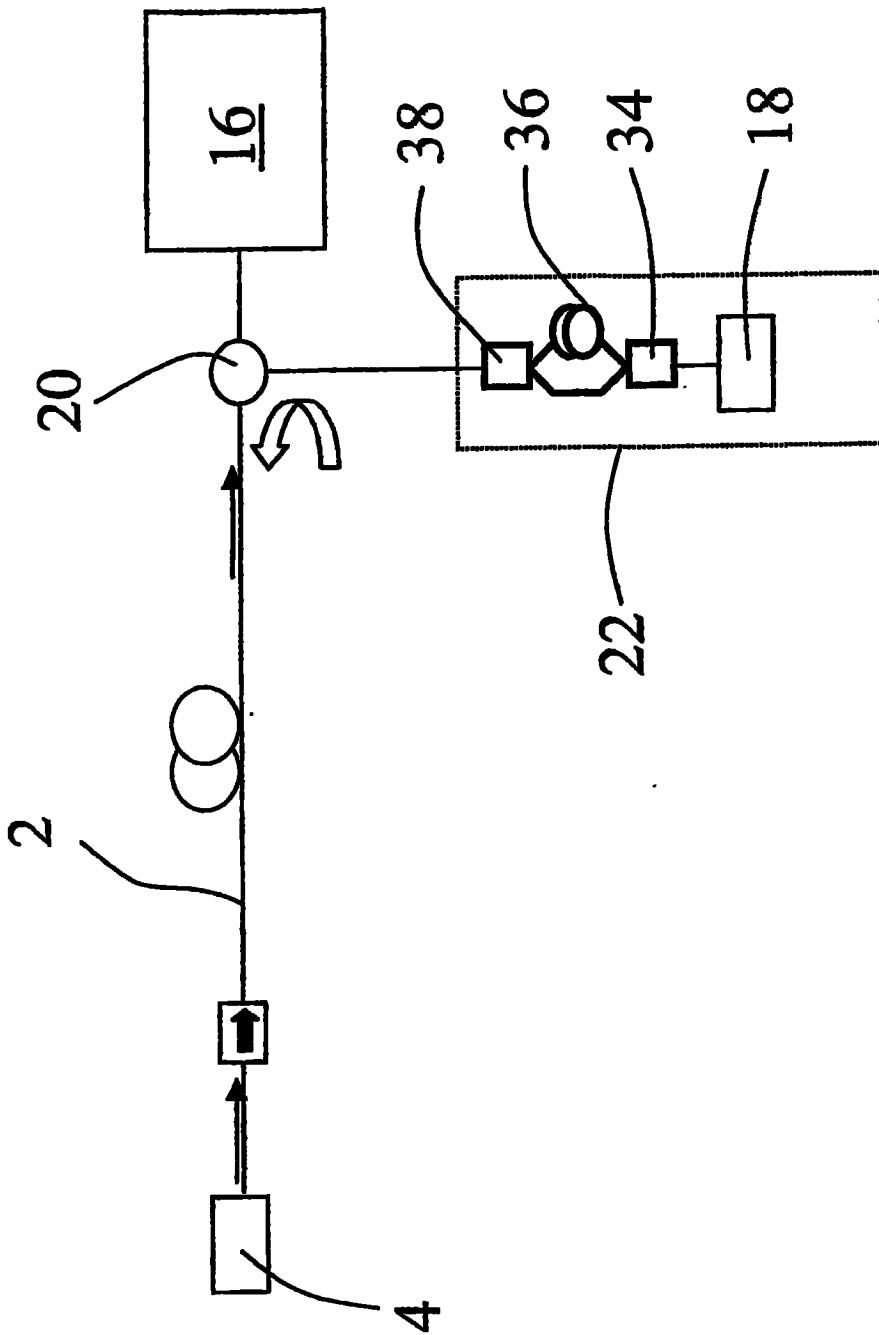


图 12



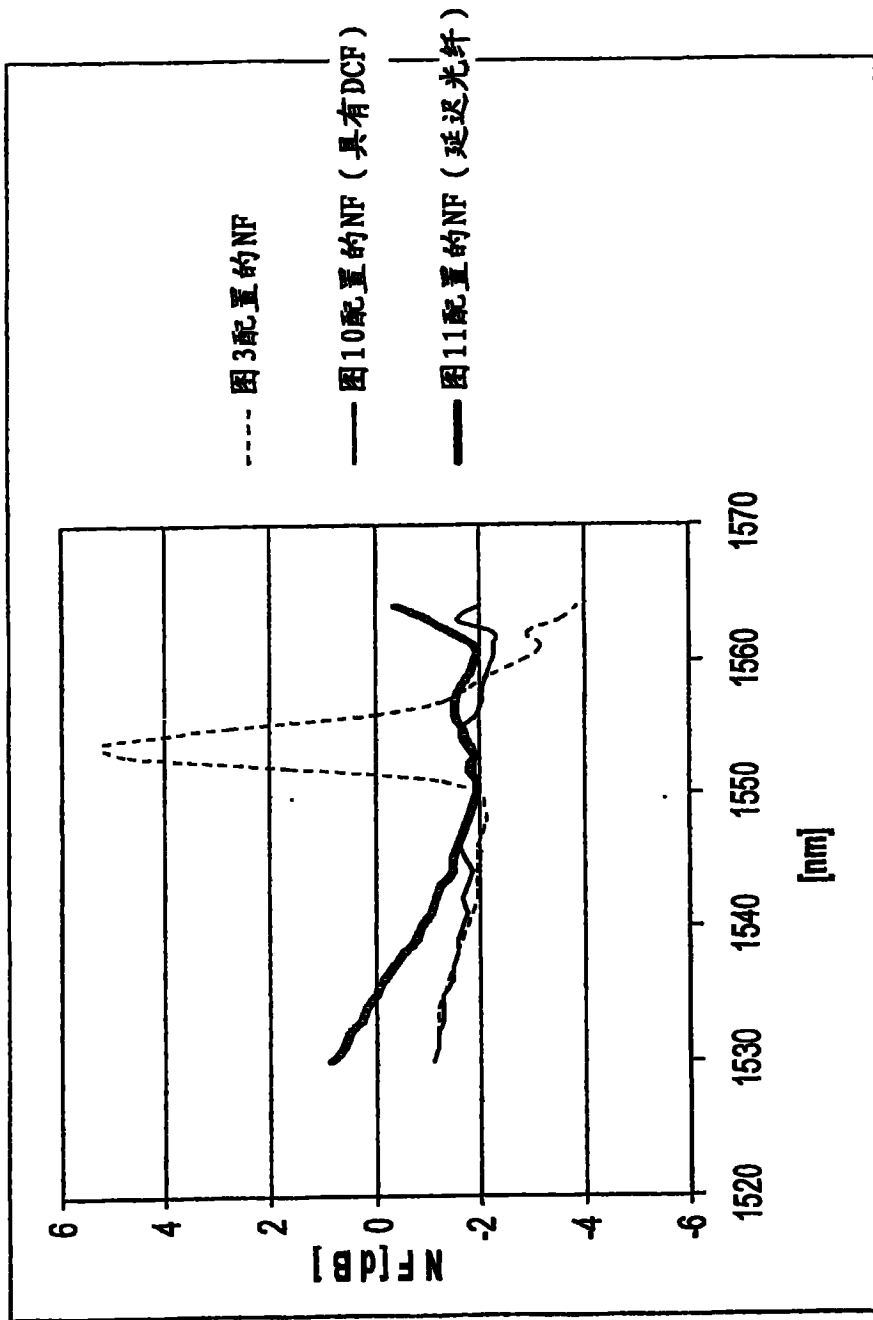


图 13

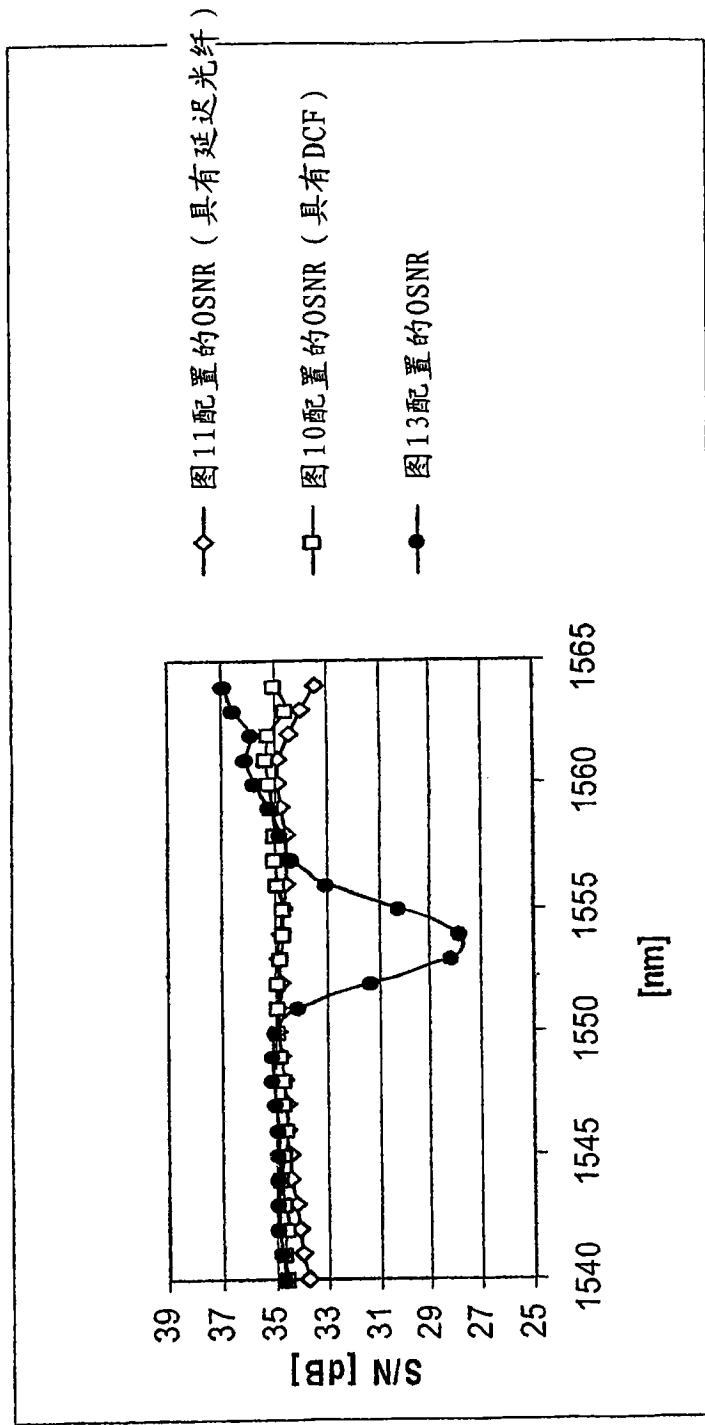


图 14

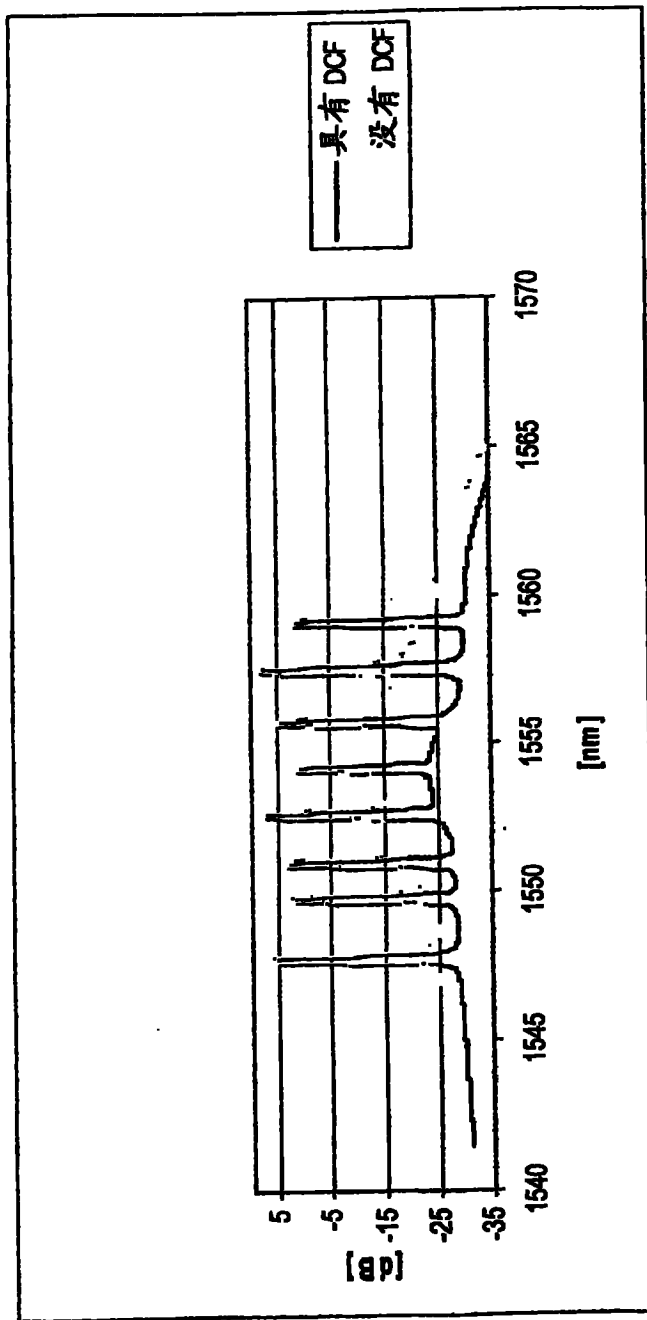


图 15

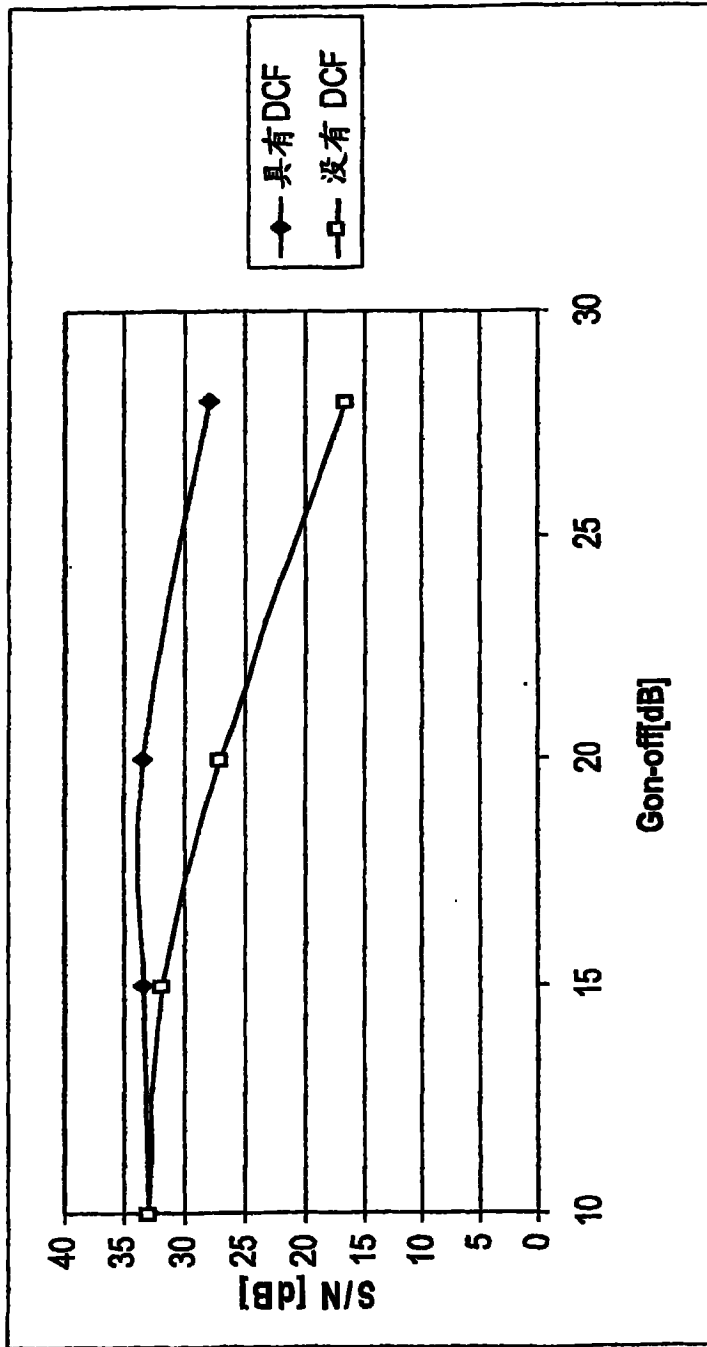


图 16

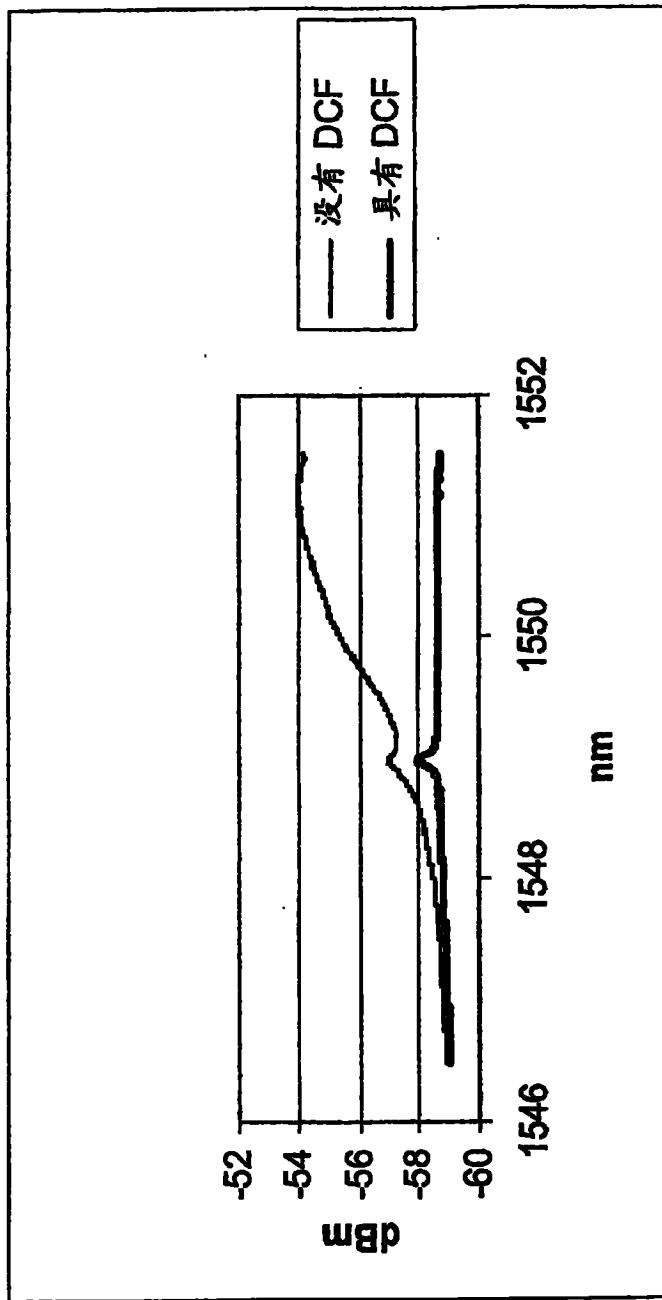


图 17

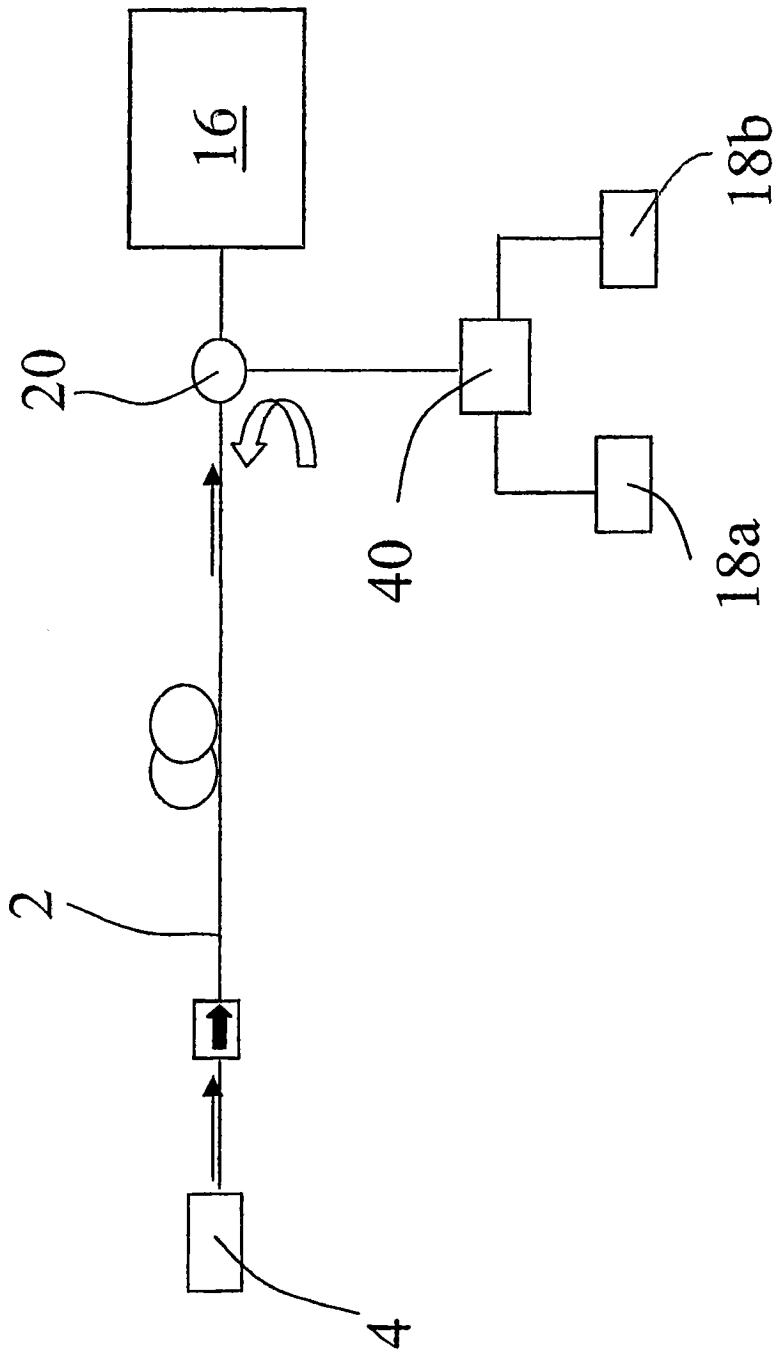


图 18

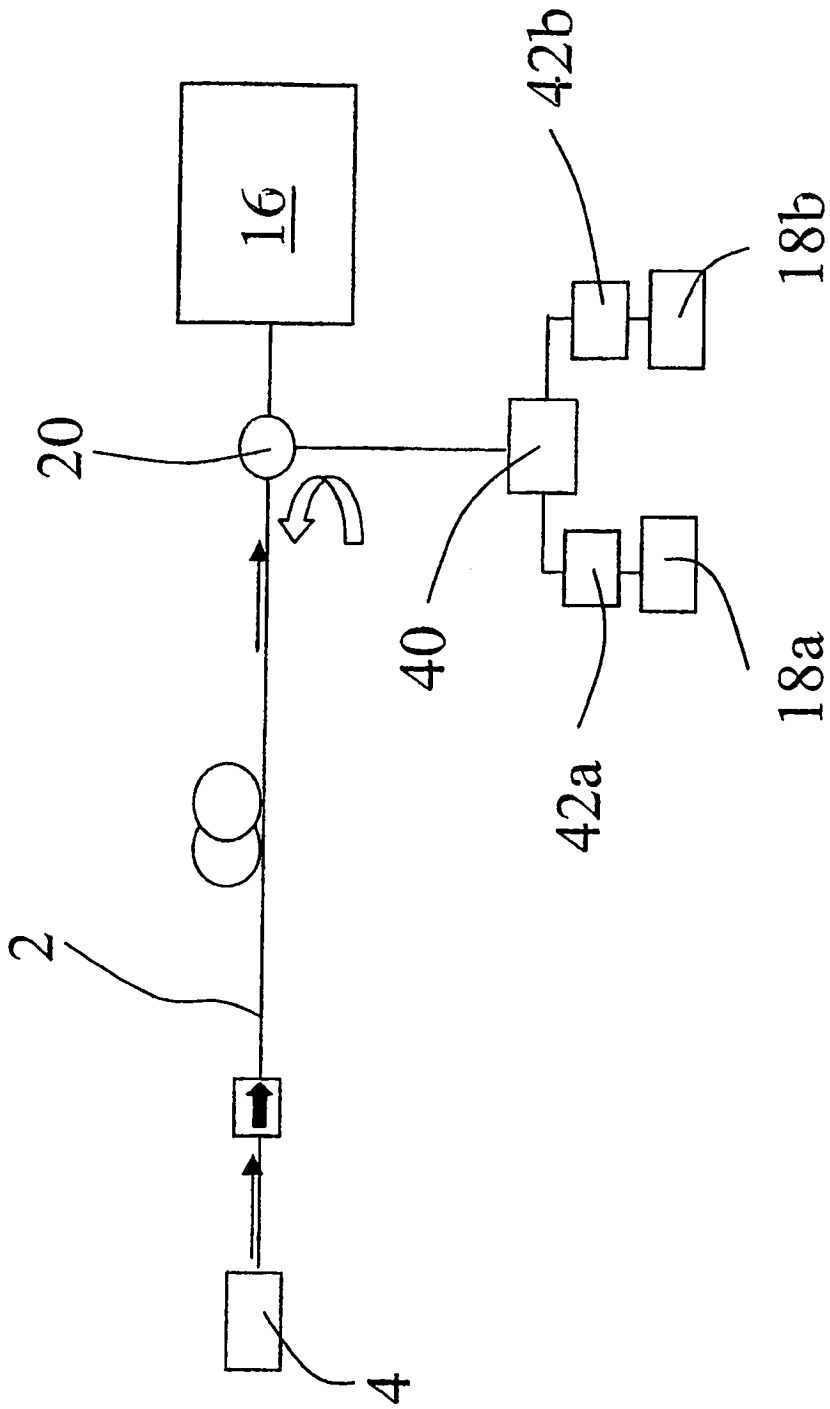


图 19